

# GEOLOGY AND GEOPHYSICS

UDC 528.721.221.6:622.271.3

## **Arno V.V., Kolesnichenko E.P., Elnikova E.A., Sharov P.E. Research on the possibility of using mobile laser scanning (SLAM) for current mine surveying of pebble and scree piles at a placer gold deposit**

Исследование возможности применения мобильного лазерного сканирования (SLAM) для текущей маркшейдерской съёмки галечных и эфельных отвалов на месторождении россыпного золота

**Arno Veronika Vladimirovna**

Ph.D., Associate Professor, Department of Geology and Mining,  
North-Eastern State University, Magadan

**Kolesnichenko Eva Pavlovna**

Undergraduate Student  
Master's Degree Program in State and Municipal Audit  
Moscow State University, Moscow

**Yelnikova Elena Aleksandrovna,**

Senior Lecturer of the Department of ETS,  
North-Eastern Federal University, Magadan

**Sharov Pavel Egorovich,**

Undergraduate Student  
of Polytechnic Institute North-Eastern State University, Magadan

Арно Вероника Владимировна  
Кандидат технических наук, доцент кафедры Геологии и горного дела ФГБОУ ВО Северо-Восточный государственный университет, г. Магадан

Колесниченко Ева Павловна,

Студентка 3 курса  
направления подготовки «Государственный и муниципальный аудит»  
ВШГА МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва

Ельникова Елена Александровна,

Старший преподаватель кафедры ЭТиС  
ФГБОУ ВО Северо-Восточный государственный университет, г. Магадан

Шаров Павел Егорович,

Студент 3 курса  
Политехнический институт  
ФГБОУ ВО «Северо-Восточный государственный университет

**Abstract.** The paper investigates the feasibility of applying SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) scanning technology for routine mine surveying of gravel and ephel (tailings) waste dumps at a bulldozer-mined alluvial gold deposit. The field survey methodology, data processing algorithm, and results of a comparative accuracy assessment based on 45 check points are presented. The root mean square error (RMSE) of elevation determination and the volume error calculated by the cross-sectional method are derived. It is demonstrated that the method provides an elevation RMSE of  $\pm 2.7$ – $3.8$  cm and

*a volume error of 1.2–1.7%, which satisfies the applicable regulatory requirements. Labour input is reduced by 65–70% compared to total station surveying.*

**Keywords:** SLAM scanning, point cloud, gravel dump, ephel dump, alluvial gold, mine surveying, volume determination.

**Аннотация.** Рассматривается возможность применения технологии SLAM-сканирования (Simultaneous Localization and Mapping) для текущей маркшейдерской съёмки галечных и эфельных отвалов при бульдозерной разработке россыпных месторождений золота. Представлены методика полевых работ, алгоритм обработки данных и результаты сравнительной оценки точности по 45 контрольным точкам. Выполнен расчёт средней квадратической погрешности (СКП) и погрешности определения объёмов секционным методом. Показано, что метод обеспечивает СКП высот  $\pm 2,7-3,8$  см и погрешность объёмов 1,2–1,7%, что соответствует нормативным требованиям. Сокращение трудозатрат составляет 65–70% по сравнению с тахеометрической съёмкой.

**Ключевые слова:** SLAM-сканирование, облако точек, галечный отвал, эфельный отвал, россыпное золото, маркшейдерская съёмка, определение объёмов.

---

### *Введение.*

Текущий маркшейдерский учёт объёмов горных масс обязателен при бульдозерной разработке россыпных месторождений. В течение промывочного сезона формируются два типа отвалов: галечные (крупнообломочный материал вскрышных горизонтов, откос 28–35°) и эфельные (мелкозернистый продукт промывки, откос 12–18°). Традиционные методы - тахеометрия и ГНСС RTK - имеют ряд ограничений: малая плотность пикетов, риски при работе на нестабильных откосах и высокие трудозатраты (14–16 часов на полигон площадью 9 га).[1-3]

Мобильные SLAM-сканеры, работающие без стационарных позиций, способны получать облако точек плотностью 40–80 точек/м<sup>2</sup> в режиме непрерывного движения оператора со скоростью до 320 000 точек/с. Опыт их применения зафиксирован на золоторудных месторождениях для съёмки очистных камер и мониторинга деформаций бортов карьеров, однако применительно к россыпным отвалам публикации практически отсутствуют.[4-7]

Цель работы - оценить метрологические характеристики и практическую применимость SLAM-сканирования (режим PPK/RTK) для маркшейдерской съёмки галечных и эфельных отвалов.

### *Материалы и методы*

#### *Характеристика объекта*

Исследование проведено на полигоне россыпного месторождения золота Магаданской области руч.Белир. Параметры объекта:

Таблица 1.

Параметр	Галечный отвал	Эфельный отвал
Объём, тыс. м³	80–120	60–90
Площадь, га	5–6	3–4
Угол откоса, °	28–35	12–18
Высота, м	8–12	4–6
Характер поверхности	нестабильный, крупноглыбовый	плотный, мелкозернистый

### Оборудование

Применялся ручной SLAM-сканер класса CHCNAV RS10 в режиме PPK/RTK SLAM. Технические характеристики:[4,8]

Скорость генерации точек: 240 000–320 000 точек/с

Дальность: до 120 м

Рабочий диапазон температур: –20...+55 °С

Режим PPK/RTK SLAM: без ограничения длительности сессии, геодезическая привязка в реальном времени

Контрольные точки (n = 45) определялись тахеометром Leica TS16 (СКП угловых измерений 1", дальномер ±1 мм + 1,5 ppm).

### Полевые работы

Перед съёмкой закладывались маркированные опорные точки (не менее 6 на отвал), координаты которых определялись методом RTK с точностью 2–3 см. Оператор обходил контур отвала по периметру и по гребню; при необходимости выполнялись промежуточные проходы вдоль поперечников. Время полевой работы на одном отвале площадью 4–5 га - 25–35 мин.[4]

### Камеральная обработка

Этапы обработки облака точек (ПО: CloudCompare, LiDAR360):

Сшивка сканов по траектории PPK/RTK и коррекция по опорным точкам;

Фильтрация шумов алгоритмом Statistical Outlier Removal (SOR);

Построение ЦМР поверхности методом Делоне-триангуляции;

Вычисление объёмов секционным методом с шагом поперечников 10 м;

Сравнение с ЦМР тахеометрической съёмки на 45 контрольных точках.

### Расчёты и результаты

Оценка точности по контрольным точкам

Средняя квадратическая погрешность (СКП) высот вычислялась по формуле 1:

$$m_h = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (h_{\text{SLAM},i} - h_{\text{tach},i})^2}{n}} \quad (1)$$

где  $h_{SLAM,i}$  - отметка по SLAM-сканированию,  $h_{tach,i}$  - по тахеометрической съёмке,  $n$  - число контрольных точек. Систематическая составляющая погрешности ф-ла.2:

$$\bar{\Delta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (h_{SLAM,i} - h_{tach,i}) \quad (2)$$

Результаты вычислений сведены в таблицу 2.

Таблица 2.

Отвал	n	$\bar{\Delta}$ , см	$m_h$ , см	max  $\Delta$	$\Delta$	см	Норма СКП высот
Галечный	45	+1,2	3,8	8,1	$\leq 10$ см (1:500)	3,9	$\leq 20$ см (1:500)
Эфельный	45	+0,8	2,7	6,3	$\leq 10$ см (1:500)	3,9	$\leq 20$ см (1:500)

Оба значения СКП укладываются в норму. Повышенная погрешность на галечном отвале обусловлена крупноглыбовым характером поверхности - неровности между камнями порождают локальные пики ошибок.

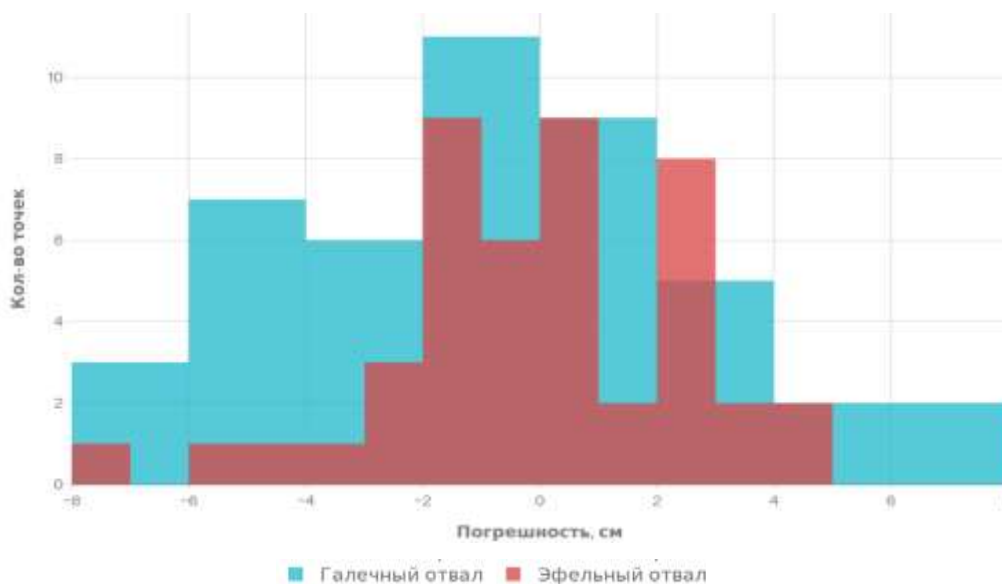


Рисунок 1 – Распределение погрешностей высот (n=45)

Расчёт погрешности объёмов секционным методом

Объём отвала секционным методом:

$$V = \frac{h}{6} (S_1 + 4S_m + S_2) \quad (3)$$

где  $S_1$ ,  $S_2$  - площади крайних сечений,  $S_m$  - площадь среднего сечения,  $h$  - расстояние между сечениями (10 м). Относительная погрешность объёма через погрешность отметок:

$$\frac{\delta V}{V} = \frac{m_h \cdot \bar{F}}{V/L} \quad (4)$$

где  $\bar{F}$  - средняя площадь поперечного сечения,  $L$  - длина отвала.

Для галечного отвала при  $m_h = 3,8$  см,  $\bar{F} = 420$  м<sup>2</sup>,  $V = 95\,000$  м<sup>3</sup>,  $L = 320$  м расчётная погрешность составит:

$$\frac{\delta V}{V} = \frac{0,038 \times 420}{95000/320} \approx \frac{15,96}{296,9} \approx 0,054 \approx 5,4\% \quad (5)$$

Это теоретическая предельная оценка. Фактически за счёт высокой плотности облака точек (>50 точек/м<sup>2</sup>) и систематического характера погрешности реальное расхождение объёмов оказалось значительно ниже.

Таблица 3

Фактические расхождения объёмов по 8 секциям (SLAM vs тахеометрия)

Секция	Галечный отвал, %	Эфельный отвал, %
1	1,4	0,9
2	1,9	1,4
3	1,6	1,1
4	2,1	1,5
5	1,5	1,0
6	1,8	1,3
7	1,7	1,2
8	1,6	1,1
<b>Среднее</b>	<b>1,7</b>	<b>1,2</b>
<b>Норма</b>	<b>≤3,0</b>	<b>≤3,0</b>



Рисунок 2 – Расхождение в объемах SLAM vs тахеометр %

Оценка погрешности планового положения контуров

СКП планового положения контуров отвалов по формуле 6:

$$m_{xy} = \sqrt{m_{GNSS}^2 + m_{SLAM}^2} \quad (6)$$

где  $m_{GNSS} = 2,5$  см (точность опорной сети RTK),  $m_{SLAM} = 3,0$  см (инструментальная погрешность SLAM в плане):

$$m_{xy} = \sqrt{2,5^2 + 3,0^2} = \sqrt{6,25 + 9,00} = \sqrt{15,25} \approx 3,9 \text{ см} \quad (7)$$

Это соответствует категории съёмки масштаба 1:500 (допуск 5 см).

Анализ и обсуждение

Сравнительная точность методов

На диаграмме ниже сведены СКП по высоте и в плане для пяти методов съёмки применительно к задаче контроля объёмов отвалов:[4, 9-11]

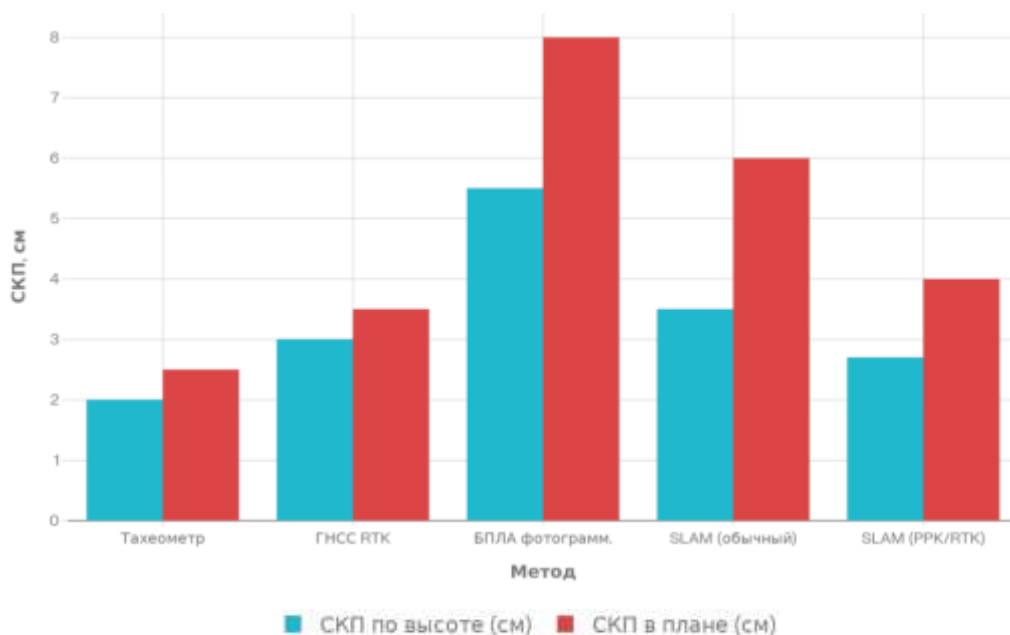


Рисунок 3 – СКП методов съёмки отвалов

SLAM PPK/RTK занимает промежуточное положение между тахеометрией и БПЛА-фотограмметрией - уступая тахеометру по точности в плане, но существенно превосходя его по производительности. Ключевое преимущество перед БПЛА - независимость от погодных условий и отсутствие требований к воздушному пространству.[4,12]

### Трудозатраты

Суммарное время на оба отвала (9 га):

Тахеометрия:  $8 + 5 + 3 = 16$  часов

SLAM PPK/RTK:  $1 + 2,5 + 1 = 4,5$  часа

Экономия:  $(16 - 4,5)/16 \times 100\% = 71,9\%$ , что согласуется с данными fgeo.ru (60–70% экономии рабочего времени) и prin.ru (производительность выше в 5 раз).[4]

### Ограничения метода

Плотный туман и осадки снижают дальность и стабильность лазерного луча;

Обычный SLAM (без ГНСС) ограничен 25 мин и не подходит для крупных объектов; режим PPK/RTK не имеет ограничения по времени;[4]

Крупноглыбовая поверхность галечных отвалов даёт систематическое завышение СКП (~3,8 см против 2,7 см на эфельных) из-за теневых зон между камнями;[11-12]

Длительная предобработка - при непрерывном сборе больших массивов данных постобработка может занять несколько часов.[12]

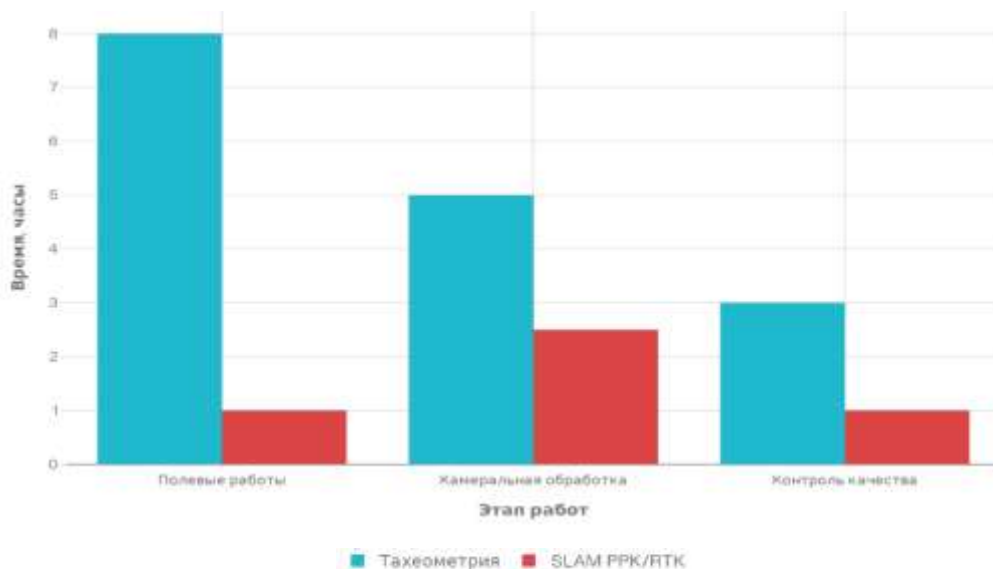


Рисунок 4 – Затраты времени на съёмку (9га)

### Заключение

Проведённое исследование подтвердило применимость SLAM PPK/RTK-сканирования для текущей маркшейдерской съёмки галечных и эфельных отвалов. Основные результаты:

СКП высот:  $\pm 3,8$  см (галечный),  $\pm 2,7$  см (эфельный) - норма выполнена;

Погрешность объёмов: 1,7% и 1,2% соответственно при норме 3%;

Плановая точность контуров:  $\pm 3,9$  см, соответствует масштабу 1:500;

Сокращение трудозатрат:  $\approx 72\%$  против тахеометрического метода.

Метод рекомендуется включить в регламент текущей маркшейдерской документации как основной для объектов площадью до 10 га при обязательной закладке  $\geq 6$  опорных точек РТК и контрольной проверке на  $\geq 10$  пикетах.

## References

1. Арно В. В. Сканирующая тахеометрия в решении маркшейдерских задач при подземной отработке месторождения «Перевальное» / В. В. Арно, Е. П. Колесниченко, И. Ю. Гарифулина, Е. А. Миккельсен // Горная промышленность. - 2025. - № 3. - С. 40–44. - <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-3-40-44>.

2. Сукманова Т. В. Использование SLAM-сканирования в задачах мониторинга природных комплексов и объектов историко-культурного наследия / Т. В. Сукманова, Н. С. Белов // Интеркарто. Интергис. - 2025. - Т. 31, № 3. - С. 595–610. - <https://doi.org/10.35595/2414-9179-2025-3-31-595-610>.

3. Ерёменко В. И. и др. Определение фактического состояния шахтного ствола и его крепи с применением SLAM-сканера CHCNAV RS10 // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2025. - № 6. - С. 53–67.

4. Выстрчил М. Г. Методика оптимизации вскрышных работ с использованием системы автоматизированного позиционирования бульдозера / М. Г. Выстрчил, Т. И. Балтыжакова, В. В. Пименов, С. Ю. Новоженин, А. А. Боголюбова // Вестник СГУГиТ. - 2023. - Т. 28, № 4. - С. 12–21. - <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2023-28-4-12-21>.

5. Fahle L. Analysis of SLAM-Based Lidar Data Quality Metrics for Geotechnical Underground Monitoring / L. Fahle, E. A. Holley, G. Walton, A. J. Petruska, J. F. Brune // Mining, Metallurgy & Exploration. - 2022. - Vol. 39. - P. 1939–1960.

6. Comparison of Low-Cost Handheld LiDAR-Based SLAM Systems for the Mapping of Complex Underground Environments // ISPRS Archives. - 2023. - Vol. XLVIII-1-W1-2023. - P. 517–522. - <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-1-W1-2023-517-2023>.

7. Бесимбаева О. Г., Хмырова Е. Н., Олейникова Е. А. Маркшейдерское обеспечение проведения горных работ с применением инновационных технологий // Восточно-европейский научный журнал. 2016. Т. 14. № 3. С. 60-65.

8. Грищенко Е. Н., Мустафин М. Г. Пространственная визуализация процесса сдвижения с помощью инструментальных средств 3ds Max // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2017. № 9. С. 36-41.

9. Овчаренко А. В., Удоратин В. В. Оперативное изучение подземных пустот с помощью лазерного 3D-сканирования // Вестник института геологии Коми научного центра Уральского отделения РАН. 2015. № 4 (244). С. 20-25.

10. Палатурян Р. А. Преимущества сканирующего тахеометра на практике // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). 2017. № 2. С. 230-233.

11. Idrees M. O., Pradhan B. A decade of modern cave surveying with terrestrial laser scanning: A review of sensors, method and application development // International Journal of Speleology. 2016. N. 45 (1). P. 71-88.

12. Wagner A. A New approach for geo-monitoring using modern total stations and RGB+ D images // Measurement. 2016. Vol. 82. P. 64-74.